

# Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Melhorado com Ácido Fosfórico e Cinza de Casca de Arroz para Aplicação em Sub-base e Base de Pavimentos

Lucas Eduardo Dornelles

Doutorando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, [lucascivilufsm@gmail.com](mailto:lucascivilufsm@gmail.com)

Paula Taiane Pascoal

Pesquisadora, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, [paulatpascoal@gmail.com](mailto:paulatpascoal@gmail.com)

Deison Mathias Konzen

Engenheiro Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, [deisonmk@gmail.com](mailto:deisonmk@gmail.com)

Laura Coden Tassinari

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, [lauractassinari01@gmail.com](mailto:lauractassinari01@gmail.com)

Magnos Baroni

Docente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, [magnos.baroni@ufsm.br](mailto:magnos.baroni@ufsm.br)

**RESUMO:** Em regiões onde predominam solos com baixa capacidade de suporte, as condições geotécnicas tornam-se desfavoráveis à execução de obras de engenharia, demandando intervenções como o melhoramento do solo. As adições mais convencionais são o cimento Portland e a cal, materiais de alto custo e com significativo impacto ambiental. Nesse contexto, o uso de materiais alternativos surge como uma solução mais sustentável. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento resiliente de um solo laterítico, proveniente de Cruz Alta/RS, melhorado com cinza de casca de arroz (CCA) e ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ). Em laboratório, foram moldadas amostras do solo argiloso com diferentes teores de CCA e  $H_3PO_4$ , compactadas sob energias intermediária e modificada, e submetidas a distintos tempos de cura. As adições foram utilizadas de forma combinada. O desempenho do solo melhorado foi avaliado por meio dos ensaios de compressão simples e módulo de resiliência. Os resultados obtidos, indicaram um ganho de resistência à compressão com a adição de  $H_3PO_4$  e CCA. Por outro lado, a adição de CCA teve efeito negativo para a resiliência, enquanto a adição de  $H_3PO_4$  contribuiu positivamente. De modo geral, considerando os dois ensaios mecânicos, as adições de CCA e  $H_3PO_4$  foram benéficas, destacando-se as misturas S3 e S35, pelo alto potencial de aplicação.

**PALAVRAS-CHAVE:** melhoramento de solo, módulo de resiliência, sustentabilidade, resistência à compressão simples.

**ABSTRACT:** In regions where soils with low bearing capacity predominate, geotechnical conditions become unfavorable for the execution of engineering works, requiring interventions such as soil improvement. The most conventional additions are Portland cement and lime, high-cost materials with a significant environmental impact. In this context, the use of alternative materials has emerged as a more sustainable solution. The aim of this study was to evaluate the resilient behavior of a lateritic soil from Cruz Alta/RS, improved with rice husk ash (CCA) and phosphoric acid ( $H_3PO_4$ ). In the laboratory, clay soil samples were molded with different levels of CCA and  $H_3PO_4$ , compacted under intermediate and modified energies, and subjected to different curing times. The performance of the improved soil was assessed using simple compression and resilience modulus tests. The results obtained indicated a gain in compressive strength with the addition of  $H_3PO_4$  and CCA. On the other hand, the addition of CCA had a negative effect on resilience, while the addition of  $H_3PO_4$  contributed positively. In general, considering the two mechanical tests, the additions of CCA and  $H_3PO_4$  were beneficial, with mixtures S3 and S35 standing out for their high application potential.

**KEYWORDS:** soil improvement, resilient modulus, sustainability, simple compressive strength



## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de solos em estruturas de pavimento projetadas segundo a metodologia empírico-mecanicista brasileira está condicionada à realização de ensaios dinâmicos para avaliação do módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (PD). O MR expressa o comportamento elástico do material e juntamente com a espessura das camadas, determina os estados de tensões, deformações e deslocamentos da estrutura. O comportamento resiliente depende de diversos fatores, como o estado físico, a natureza e composição dos materiais, o grau de saturação, a densidade e umidade de compactação, além do histórico e estado de tensões, entre outros (Camapum et.al, 2015; Kodikara et al., 2018).

Dessa forma, a utilização de solos de origem tropical em obras de pavimentação pode ser inviabilizada devido à baixa capacidade de suporte do material em seu estado natural ou mesmo após a compactação. Uma alternativa para viabilizar o uso desses solos com baixa capacidade de suporte é a estabilização, seja ela química, mecânica e/ou granulométrica (Bilgen, 2020). Estabilizantes tradicionais, como cimento, cal, cinzas volantes e materiais betuminosos, são amplamente utilizados e estudados. No entanto, estabilizantes não tradicionais ainda requerem análises mais aprofundadas para comprovar sua eficácia no tratamento de solos. (Güllü et al., 2017; Scheuermann Filho, 2019; Dornelles, 2020).

A cinza da casca de arroz (CCA) é um resíduo gerado em escala global, e seu aproveitamento é relevante sob a perspectiva da sustentabilidade. O Brasil é um dos maiores produtores de arroz do mundo, com 12,3 milhões de toneladas produzidas em 2024, sendo a região Sul responsável por cerca de 70% da produção nacional (CONAB, 2025). A casca de arroz é utilizada como combustível para fornos no processo de secagem do arroz, gerando grande quantidade de cinzas. Frequentemente, esse processo não possui controle adequado da temperatura, da queima e do tempo de resfriamento, o que compromete as propriedades pozolânicas da CCA. Como consequência, o resíduo necessita ser descartado em aterros industriais, o que acarreta passivos ambientais e custos com transporte e destinação final.

Diversos estudos demonstram que o uso da CCA pode gerar resultados positivos em aplicações na área de pavimentação (Rahgozar et al., 2018; Jittin et al., 2020). Conforme Basha et al. (2003), trata-se de um material leve, volumoso, com alta porosidade, composto por mais de 90% de sílica. Suas características físico-químicas estão diretamente relacionadas ao processo de queima – temperatura, tempo e método de resfriamento.

O ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) é utilizado em diversas indústrias, como a farmacêutica e a alimentícia, e tem se mostrado promissor também na estabilização de solos tropicais (Eisazadeh et al., 2010). Considerando que a estabilização ocorre pela ação química do aditivo sobre os minerais do solo, os solos finos são os mais adequados para esse tipo de tratamento. Isso se deve ao fato de que a interação do  $H_3PO_4$  com argilas finas favorece a formação de compostos de fósforo com ferro ou alumínio, os quais são duros, insolúveis e cristalinos. A presença de  $Fe_2O_3$  livre promove essa reação, aumentando significativamente a capacidade de suporte do solo tratado. Esse processo de estabilização gera ligações químicas fortes e, em caso de lixiviação, não haverá danos ambientais causados pelos compostos gerados (Medina e Guida, 1995).

De acordo com Eisazadeh et al. (2010), a adição isolada da CCA não proporciona ganhos significativos de resistência e resiliência em misturas com solo laterítico. No entanto, a adição combinada com o  $H_3PO_4$  viabiliza o uso desse resíduo, agregando valor ambiental, melhorando a trabalhabilidade e o desempenho mecânico das misturas. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do uso da cinza da casca de arroz e do ácido fosfórico, de forma isolada e combinada, no melhoramento de solo laterítico, visando à sua aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização física, resistência à compressão simples e módulo de resiliência, considerando-se as energias de compactação intermediária e modificada.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O solo utilizado neste estudo é proveniente do município de Cruz Alta, localizado no estado do Rio Grande do Sul. Sua coleta foi realizada no horizonte pedológico B, sob as coordenadas 28°37'39.40" Sul e 53°37'30.50" Oeste. O solo em questão tem origem no arenito Botucatu ou na junção do arenito Botucatu com o basalto.

A cinza de casca de arroz (CCA) utilizada foi proveniente de uma indústria localizada em Alegrete, no Rio Grande do Sul (Brasil), sendo gerada pela queima da casca em forno de secagem de arroz sem controle de



temperatura, tempo de queima ou resfriamento. A CCA apresenta coloração escura devido ao alto teor de carbono, resultante da queima em temperaturas entre 400 °C e 700 °C. Nessa faixa, a cinza tende a apresentar estrutura amorfa, favorecendo reações pozolânicas na presença de hidróxidos de cálcio.

O ácido fosfórico utilizado é de uso comercial, produzido pela indústria de fertilizantes, e apresenta-se como um líquido viscoso, com densidade de 1,68 e pH de 0,9, sendo miscível em água e álcool. Trata-se de um ácido inorgânico semiforte, com grau de ionização de 27%, valor que representa a porcentagem de hidrogênios ionizados em solução aquosa a 18°C.

Este trabalho utiliza os resultados da caracterização física do solo desenvolvida por Pascoal (2020), apresentados na Tabela 1. O ensaio de compactação do solo, sem adição de CCA ou ácido fosfórico, foi realizado nas energias intermediária e modificada, conforme os preceitos da normativa do DNIT (2018), com compactação por impacto para obtenção dos parâmetros de umidade ótima ( $W_{ót}$ ) e massa específica aparente seca máxima (MEAS).

A partir dos ensaios de caracterização procedeu-se à classificação do solo de acordo com as metodologias tradicionais da AASHTO/TRB e pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Além disso, foram realizados ensaios classificatórios segundo a Metodologia MCT, sistema de classificação de solos desenvolvido no Brasil com o propósito de compreender de forma mais adequada o comportamento dos solos tropicais, que muitas vezes não se enquadram nos critérios tradicionais utilizados em regiões de clima temperado (Nogami e Villibor, 1981; Nogami e Villibor, 1995).

Tabela 1. Caracterização física, classificações e compactação do material (Pascoal, 2020)

Caracterização	Normativa	SOLO
% pedregulho (2,0 – 4,0 mm)		0
% areia grossa (0,6 – 2,0 mm)		0
% areia média (0,2 – 0,6 mm)		8
% areia fina (0,06 – 0,2 mm)	NBR 7181 (ABNT, 2016)	25
% silte (% $\mu\text{m}$ – 0,06 mm)		26
Argila (% $\mu\text{m}$ )		41
Massa específica real dos grãos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	NBR 6508 (ABNT, 2016)	2,78
Limite de liquidez (%)	NBR 6459 (ABNT, 2016)	55
Limite de plasticidade (%)	NBR 7180 (ABNT, 2016)	44
Índice de plasticidade (%)		11
Classificação AASHTO/TRB	-	A-7-6
Classificação SUCS	-	MH LG'
Classificação MCT	DNER-CLA 259/1996	$c': 2,35$ $d': 67,0$ $e': 0,69$
		Intermediária MEAS: 1625 $\text{kN}/\text{m}^3$
Ensaio de compactação	DNIT 134 (DNIT, 2018)	$W_{ót}$ : 28,9% Modificada MEAS: 1652 $W_{ót}$ : 22,6%

A análise da distribuição granulométrica do solo indica a presença de 67% de grãos finos e 33% de material arenoso. Com base nos limites de Atterberg, o solo apresenta alta plasticidade, o que corrobora os dados granulométricos e evidencia a predominância de partículas argilosas. Quanto às classificações AASHTO e SUCS, o solo enquadra-se, respectivamente, no grupo A-7-6 — caracterizado por argilas plásticas com presença de matéria orgânica e alta compressibilidade — e no grupo MH, sendo classificado como silte elástico inorgânico.

Já segundo a Metodologia MCT, desenvolvida para solos tropicais, o solo é classificado como um solo argiloso de comportamento laterítico (LG'), apresentando baixa perda de massa por imersão, elevada capacidade de suporte, baixa expansividade, baixa permeabilidade e plasticidade de média a alta.

## 2.2 Métodos

Foram analisadas dez diferentes condições com o objetivo de comparar o comportamento mecânico de um solo laterítico natural estabilizado com cinza de casca de arroz (CCA) e ácido fosfórico, submetidas a duas energias de compactação. Essas condições foram definidas com base em estudos anteriores que indicaram teores adequados de CCA entre 3% e 5%, e limites de adição de  $H_3PO_4$  de até 3% (Medina e Guida, 1995; Budny, J, 2018).

Duas condições foram estabelecidas como referência, consistindo no solo natural compactado, submetido às duas diferentes energias de compactação. As oito condições restantes englobaram misturas do solo com diversas combinações de  $H_3PO_4$  (1% ou 3%) e CCA (5% ou 10%), também compactadas sob dois níveis distintos de energia. As energias de compactação seguiram os procedimentos estabelecidos para os ensaios Proctor, sendo correspondentes ao Proctor intermediário (EI), com valor específico de  $13 \text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ , e ao Proctor modificado (EM), com  $27,3 \text{ kgf}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ . A nomenclatura das amostras foi definida com base nos teores de estabilizantes e no nível de energia de compactação aplicado, estando apresentada no item 3, juntamente aos resultados da compactação para cada condição de mistura.

Ensaio triaxiais de cargas repetidas para determinação do módulo de resiliência (MR) foram realizados de acordo com a normativa do DNIT 134 (DNIT, 2018), com o intuito de avaliar a deformabilidade nas diferentes condições de ensaio. A preparação das amostras consistiu na homogeneização do solo com os teores correspondentes de CCA e  $H_3PO_4$ , seguida da compactação em moldes cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. A moldagem dos corpos de prova foi realizada em compactador de impacto mecânico, respeitando-se as variações máximas de  $\pm 0,5\%$  em relação à umidade ótima e  $\pm 1,0\%$  em relação à densidade máxima.

Os ensaios de MR foram realizados em diferentes idades de cura, sendo apresentados neste artigo somente os resultados de 28 dias. Para a determinação dos parâmetros resilientes, foi utilizado o modelo consolidado na literatura e empregado no software Medina. O modelo composto, apresentado na Equação 1, considera as tensões confinante e desviadora, ambas aplicadas às amostras durante o ensaio triaxial de cargas repetidas (Pezo et al., 1992).

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

Onde:  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ : parâmetros de regressão;  $MR$ : módulo de resiliência;  $\sigma_3$ : tensão de confinamento;  $\sigma_d$ : tensão desviadora.

Para identificar o comportamento do ácido fosfórico e da cinza de casca de arroz na resistência do solo, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (RCS), conforme a normativa NBR 12025 (ABNT, 2012), em corpos de prova de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, moldados segundo as condições ótimas de compactação. As amostras foram ensaiadas nas idades de cura de 7 dias, para as duas condições do solo referência, e de 7 e 28 dias para as demais misturas.

### 3 RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta as condições avaliadas, as nomenclaturas adotadas, os níveis de energia de compactação aplicados, bem como os parâmetros ideais de compactação das amostras. Os resultados indicaram que o aumento da energia de compactação elevou a densidade seca máxima e reduziu o teor de umidade ótima em todas as misturas. No entanto, observou-se que a incorporação de CCA, nas diferentes proporções, provocou uma diminuição gradual da densidade seca máxima, comportamento atribuído à menor densidade relativa das partículas da cinza, efeito que corrobora estudos anteriores (Freitas, J.E., 2018; Behak e Núñez, 2008).

Tabela 2. Parâmetros de compactação e nomenclaturas utilizadas

Condição	Energia de compactação	Nomenclatura adotada	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$W_{\acute{o}t}$ (%)
Solo referência	Intermediária	Solo – EI	1625	25,60
	Modificada	Solo – EM	1652	22,60





Solo + 3% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Intermediária	S3 – EI	1683	22,49
	Modificada	S3 – EM	1729	21,67
Solo + 1% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + 5% CCA	Intermediária	S15 – EI	1581	27,15
	Modificada	S15 – EM	1657	24,19
Solo + 3% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + 5% CCA	Intermediária	S35 – EI	1585	27,22
	Modificada	S35 – EM	1644	24,72
Solo + 3% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + 10% CCA	Intermediária	S310 – EI	1504	27,17
	Modificada	S310 – EM	1605	25,17

A partir da realização dos ensaios de módulo de resiliência, foi realizada uma análise por regressão não linear múltipla, utilizando-se o modelo composto. Os parâmetros  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  estão apresentados na Tabela 3, assim como os valores de MR mínimo, máximo e médio para cada condição avaliada. Ao comparar as duas energias de compactação, observa-se que o valor do módulo de resiliência aumenta com a transição da energia intermediária para a modificada.

Com o intuito de facilitar a visualização do comportamento mecânico das condições avaliadas, a Figura 1 apresenta o módulo de resiliência médio ajustado pelo modelo composto aos 28 dias, juntamente aos resultados de resistência à compressão simples obtidos aos 7 e 28 dias.

Tabela 3. Parâmetros resilientes e valores de MR para cada condição do solo

Condição	Parâmetros MR				MR mínimo (MPa)	MR máximo (MPa)	MR médio (MPa)
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$			
Solo – EI	739,20	0,34	0,00	0,90	195,5	378,8	286,8
Solo – EM	1640,16	0,43	0,08	0,93	223,1	657,0	423,3
S3 – EI	2494,14	0,53	0,10	0,96	211,3	808,6	475,4
S3 – EM	2574,28	0,53	0,08	0,99	246,2	859,2	522,6
S15 – EI	957,30	0,48	0,00	0,91	150,4	378,5	259,8
S15 – EM	1755,25	0,49	0,17	0,92	134,8	579,3	325,6
S35 – EI	1679,36	0,51	0,14	0,95	133,1	546,6	312,8
S35 – EM	3215,45	0,72	0,10	0,97	133,1	721,9	381,0
S310 – EI	1187,18	0,45	0,15	0,97	115,8	434,5	255,8
S310 – EM	2150,45	0,60	0,15	0,99	115,7	583,8	312,5

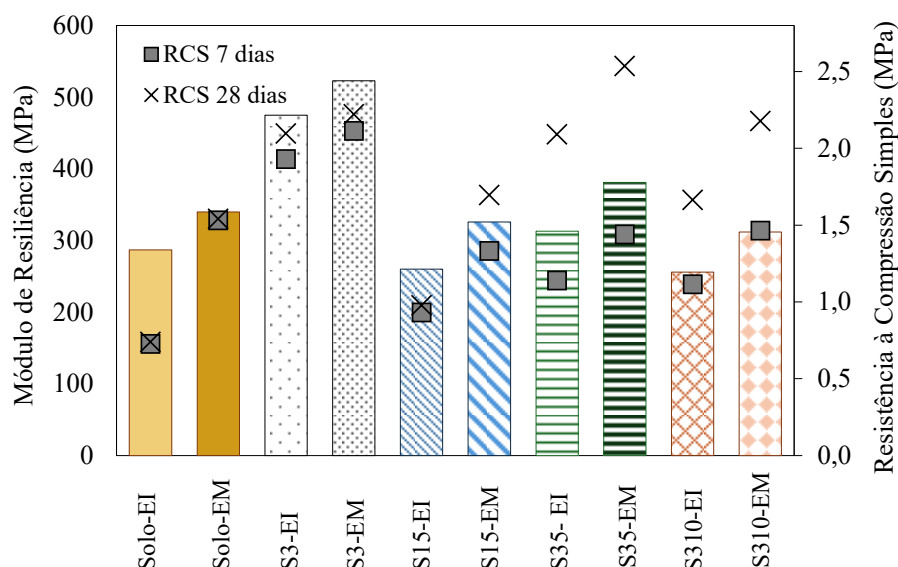


Figura 1. MR médio aos 28 dias e RCS para sete e 28 dias, para as diferentes condições de solo analisadas.

A condição S3, com adição apenas de ácido fosfórico, apresentou o melhor comportamento resiliente, atingindo 475 MPa e 523 MPa aos 28 dias, nas energias intermediária e modificada, respectivamente. A adição de CCA às misturas de solo e  $H_3PO_4$  resultou em um comportamento diferente em relação à condição S3. A elevação do teor de CCA interferiu negativamente no módulo de resiliência das misturas S15, S35 e S310, quando comparadas ao solo de referência e à mistura S3. Dentre, a S35 foi a que mais se destacou, tanto em termos de comportamento resiliente quanto de resistência à compressão simples, quando comparada às duas energias do solo de referência.

Dessa forma, ao analisar todas as condições de ensaio, conclui-se que a mistura S3 apresentou o melhor comportamento mecânico nos ensaios avaliados. Entre as amostras com CCA, a S35 obteve os melhores desempenhos. Por outro lado, a inserção de 10% de CCA não promoveu melhora significativa no comportamento da mistura S310.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos composto e universal apresentaram boas correlações, assim representando adequadamente o comportamento das condições e misturas avaliadas. Ao comparar as idades de cura dentro da mesma condição de mistura, em ambos modelos, nota-se uma elevação dos valores do  $k_1$  em todas as misturas ensaiadas, independentemente da energia de compactação. Logo, observa-se um ganho de resiliência com o aumento da idade de cura, mantendo-se a mesma dosagem.

Ao comparar as duas energias de compactação, fica evidente o acréscimo do valor de módulo de resiliência à medida em que a energia passa de intermediária para modificada. O solo compactado com energia intermediária apresentou MR médio de 287 MPa, enquanto a energia modificada resultou em 423 MPa.

No que tange a resistência à compressão simples, a variação da idade de cura não influenciou significativamente o comportamento, com valores de 0,73 MPa e 1,53 MPa para as energias intermediária e modificada, respectivamente, nas duas idades avaliadas.

A mistura S3, que envolve solo e ácido fosfórico, foi a que apresentou o melhor comportamento resiliente, atingindo 475 MPa e 523 MPa aos 28 dias, nas energias intermediária e modificada, respectivamente. Não houve um ganho expressivo de resistência à compressão com o aumento da idade de cura, variando de 1,93 a 2,10 MPa na energia intermediária e 2,11 a 2,22 MPa na energia modificada, entre os 7 e 28 dias.

O acréscimo de CCA às misturas de solo e  $H_3PO_4$  resultou em um comportamento distinto da condição S3. O aumento do teor de CCA interferiu negativamente no módulo de resiliência das misturas S15, S35 e S310, em comparação ao solo de referência e a S3. Nas idades iniciais, o valor de módulo de resiliência dessas três misturas foi inferior ao solo referência, em ambas as energias de compactação.



Entre as misturas que envolvem a CCA, a S35 foi a que se destacou, tanto no comportamento resiliente quanto em relação a resistência à compressão simples, quando comparada às duas energias do solo de referência. A S310 apresentou o pior ganho de resiliência entre as amostras que envolvem CCA à medida que o intervalo de tempo foi variado, ao passo que o pior comportamento e ganho de resistência foi atribuído à S15.

Assim, ao se analisar todas condições de ensaio, conclui-se que a mistura S3 apresentou o melhor comportamento mecânico frente aos ensaios avaliados. Entre as amostras que envolvem CCA, a S35 demonstrou bom desempenho, contudo, a inserção de 10% CCA não foi benéfica para a mistura S310.

É importante destacar que a trabalhabilidade das misturas com adição de ácido fosfórico foi inferior em comparação ao solo de referência. Contudo, a introdução da CCA na mistura atenuou esse efeito, sendo perceptível que, quanto maior o teor de cinza em relação ao ácido, melhor a trabalhabilidade da mistura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458: Grãos de Pedregulho retidos na peneira de abertura de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 10p., 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 5 p., 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p., 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 16 p., 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 9 p., 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17212: Solo – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,00 mm. Rio de Janeiro, 8 p., 2025.
- Basha, E.A.; Hashim, R.; Muntohar, A.S. (2003) *Effect of the cement - rice husk ash on the plasticity and compaction of soil*. Eletronic Journal of Geotechnical Engineering, 8 A.
- Behak, L.; Núñez, W.P. *Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, cenizas de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación*. Revista de Ingeniería de Construcción 2008, 23, 34-41. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-52950732008000100004>
- Bilgen, G. (2020) Utilization of powdered glass in lime-stabilized clayey soil with sea water. Environmental Earth Sciences, 79, 437. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09195-w>
- Budny, J. *Verificação do potencial de estabilização de um solo laterítico com o uso de ácido fosfórico, ácido cítrico e cinza de casca de arroz*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2018.
- Camapum de Carvalho, J.; Rezende, L.R.; Cardoso, F.B.F.; Lucena, L.C.F.L.; Guimarães, R.C.; Valencia, Y.G. (2015) *Tropical soils for highway construction: Peculiarities and considerations*. Transportation Geotechnics, 5, 3-19. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.004>
- Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2025) *Acompanhamento da safra brasileira. Décimo primeiro levantamento*, 10, 145.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Norma DNER-CLA 259/96: *Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura*. Rio de Janeiro, 1996. 6 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 134/2018 – ME: *Solo – Ensaio de carga repetida para determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro, 2018. 24 p.



- Dornelles, L. E. (2020) *Comportamento mecânico de um solo argiloso estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e hidróxido de sódio*. 167f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Eisazadeh, A.; Nur, H.; Kassim, K.A. (2010) *Characterization of phosphoric acid- and lime-stabilized tropical lateritic clay*. Environmental Earth Sciences, 63, 1057-1066. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0781-2>
- Freitas, J.E. Uso de cinza da casca de arroz na estabilização de solos para uso em pavimento rodoviário. Level of Dissertation, Degree-Granting Universidade de Brasília, Brasília, Brazil, 2018
- Güllü, H.; Canakci, H.; Al Zangana, I. F. (2017) *Use of cement based grout with glass powder for deep mixing*. Construction and Building Materials. 137, 12-20.
- Jittin, V.; Bahurudeen, A.; Ajinkya, S.D. (2020) *Utilisation of rice husk ash for cleaner production of different construction products*. Journal of Cleaner Production, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121578>
- Kodikara, J.; Islam, T.; Sountharajah, (2018) *A. Review of soil compaction: History and recent developments*. Transportation Geotechnics, 17, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.006>
- Medina, J.; Guida, H.N. (1995) *Stabilization of lateritic soils with phosphoric acid*. Geotechnical and Geological Engineering, 13, 199- 513 216. <https://doi.org/10.1007/BF00422210>
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. 1981. In. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Ed. Villibor, 1995. p. 169-196.
- Pezo, R.F.; Claros, G.; Hudson, W.R.; Stokoe, K.H. *Development of reliable resiliente modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design*. Department of Transportation 1992, Research Report 1177-4F, Texas, USA
- Rahgozar, M.A.; Saberian. M.; Li, J. (2018) *Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: an experimental study*. Transportation Geotechnics, 14, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.09.004>
- Scheuermann Filho, H.C. (2019) *Estabilização de um Solo Dispersivo com Pó de Vidro Moído e Cal de Carbureto*. 205f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.